西沙群岛永乐环礁礁外坡沉积物中有机碳的含量与来源分析

摘要: 有机碳埋藏作用是碳循环过程的重要环节，但迄今关于珊瑚礁沉积物中有机碳的研究却很少，影响着对珊瑚礁碳循环的准确评估。本文以南海西沙群岛永乐环礁礁外坡的现代表层沉积物为材料，分析了其总有机碳(total organic carbon, TOC)含量、总氮(total nitrogen, TN)含量、有机碳同位素($\delta^{13}C$)值以及沉积物粒度、叶绿素含量等指标。永乐环礁礁外坡的生态状况相对较好，具有代表健康珊瑚礁生态系统沉积物中有机碳特征的潜力。结果表明：1）永乐环礁礁外坡沉积物中的 TOC 含量在 0.71~1.66mg·g^{-1} 之间，平均为 1.23±0.31mg·g^{-1}；TN 含量在 0.12~0.28mg·g^{-1} 之间，平均为 0.20±0.05mg·g^{-1}。2）C/N 比值在 6.16~7.59 之间，平均为 6.75±0.34；$\delta^{13}C$ 值在-17.49~-15.85‰之间，平均为-16.61±0.49‰，表明沉积物中的有机碳以海洋自生来源为主，且主要来自底栖植物。3）有机碳含量与水深负相关，与叶绿素 a 含量和脱镁叶绿素含量正相关，表明底栖植物控制的初级生产力是礁外坡有机碳含量的主要来源。结合该区表层沉积物近 3500 年的平均沉积速率(1.27mm·a^{-1})，推测永乐环礁礁外坡有机碳埋藏通量介于 1.12~2.61g·m^{-2}·a^{-1} 之间，平均为 1.93±0.49g·m^{-2}·a^{-1}。本研究为评估南海珊瑚礁对碳循环的贡献提供了新的信息。

关键词: 珊瑚礁; 沉积物; 有机碳; 碳同位素; 永乐环礁；西沙群岛

Content and source analysis of organic carbon in outer slope sediments of Yongle Atoll, Xisha Islands

Abstract: Organic carbon burial is an important part of the carbon cycle, but there are few studies on organic carbon in coral reef sediments, which affects the accurate assessment of coral reef carbon cycle. In this paper, the modern surface sediments from the outer slope of Yongle Atoll, Xisha Islands, South China Sea, were analyzed for their total organic carbon (TOC) content, total nitrogen (TN) content, organic carbon isotope (δ13C) value, as well as sediment grain size, chlorophyll content and other indicators. The ecological condition of the outer slope of Yongle Atoll reef is relatively good, and has the potential to represent the organic carbon characteristics in sediments of healthy coral reef ecosystems. The results showed that: 1) the TOC content in the sediments from the outer slope of Yongle Atoll reef ranged from 0.71 to 1.66 mg·g^{-1}, with an average of 1.23±0.31 mg·g^{-1}; the TN content ranged from 0.12 to 0.28 mg·g^{-1}, with an average of 0.20±0.05 mg·g^{-1}. 2) the C/N ratio ranged from 6.16 to 7.59, with an average of 6.75±0.34; $\delta^{13}C$ values ranged from -17.49 to -15.85‰, with an average of -16.61±0.49‰, indicating that the organic carbon in the sediments was predominantly of marine autochthonous origin and mainly from benthic plants. 3) Organic carbon content was negatively correlated with water depth and positively correlated with chlorophyll a content and pheophytin content, indicating that primary productivity controlled by benthic plants was the main source of organic carbon content on the outer slope of the reef. Combined with the average deposition rate of surface sediments in this area over the past 3,500 years (1.27 mm·a^{-1}), it is hypothesized that the organic carbon burial flux on the outer slope of Yongle Atoll ranges from 1.12 to 2.61 g·m^{-2}·a^{-1}, with an average of 1.93±0.49 g·m^{-2}·a^{-1}. The present study provides new information for evaluating the contribution of coral reefs in the South China Sea to the carbon cycle.

Key words: coral reef; sediment; organic carbon; carbon isotope; Yongle Atoll; Xisha Islands

衡量自然生态系统捕获和储存 CO_2 的能力不仅可以为认识全球气候变化提供理论基础，且有助于制定生态系统管理策略以适应和减缓气候变化的影响(Macreadie et al, 2017)。海洋作为全球除岩石圈以外最大的碳库，吸收了约三分之一人为排放的二氧化碳(McLeod et al, 2011)，“负排放”潜力巨大，对调节全球气候有着至关重要的作用(Post et al, 1990; Falkowski et al, 2000; 焦念志 等, 2021)。沉积物作为海洋碳库的重要组成部分(Keil, 2017)，是有机碳的重要储存场所(Seiter et al, 2004; Chen et al, 2022)，其中的有机碳在自然状态下可以埋藏数百万年(Estes et al, 2019)，属于海洋碳汇的最终净效应(Berger et al, 1989)。目前关于沉积物有机碳的研究多聚焦在红树林、海草床等沿岸生态系统(Gao et al, 2019; Alemu I et al, 2022)，但对于同样是浅海典型生态系统的珊瑚礁区沉积物中的有机碳却关注甚少(Schrimm et al, 2004)。

分布于热带-亚热带浅海区的珊瑚礁虽然只约占全球海洋面积的 0.2%，却是生物多样性和有机碳初级总产量最高的海洋生态系统(Hatcher, 1988; Tanaka et al, 2011; Gove et al, 2016)，预计每年可光合固定 7 亿吨有机碳(Crossland et al, 1991)，具有潜在的碳汇功能(石拓 等, 2021)。同时，研究表明随着全球珊瑚礁健康状况的不断下降，珊瑚礁生态系统正在经历珊瑚覆盖损失和/或向藻类为主的生态系统的生态相变，群落有机代谢能力不断增强(Page et al, 2016)。自 1970 年以来，珊瑚礁群落钙化率以每年 4.3±1.9%的速度下降，有机生产力以每年 $3.0\pm0.8 mmol\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$ 的速度增加，群落钙化和光合作用基本代谢过程正在发生转变(Davis et al, 2021)。珊瑚礁沉积物的有机组成具有指示底栖生物群落结构(Miyajima et al, 1998; Kaczmarsky and Richardson, 2011; Yogesh Kumar et al, 2014)、营养物质来源(Umezawa et al, 2008; Briand et al, 2015)的功能，是记录当地环境条件的有力工具，可用来评估珊瑚礁的“健康”程度(Schrimm et al, 2004; Kaczmarsky and Richardson, 2011; Marques et al, 2019)。分析珊瑚礁沉积物中有机碳的含量、组成及源汇过程，对评估目前珊瑚礁在碳循环中的作用以及生态健康状况具有重要意义。然而目前对珊瑚礁沉积物中有机质等环境信息认识的不足阻碍了对珊瑚礁碳源汇功能的准确评估(Ke et al, 2018)。

有机碳同位素($\delta^{13}C$)和总有机碳(total organic carbon, TOC)与总氮(total nitrogen, TN)的元素比(通常表示为 C/N)是评估海洋沉积物中有机质来源的良好指标，不同来源的有机质由于其母源所处环境差异而具有不同特征(Remeikaitė-Nikienė et al, 2016; Li et al, 2021)，如陆地植被主要由木质素和纤维素组成(氮含量低)，通常具有较高的 C/N 比(达 20 及以上)；相反，藻类有机物缺乏纤维素而蛋白质丰富(氮含量高)，使 C/N 比相对较低(在 4~10 之间; Meyers, 1994; Meyers, 1997)。陆地植物的$\delta^{13}C$ 一般在-30‰~-26‰之间，甚至更低；淡水浮游植物的$\delta^{13}C$ 一般在-30‰~-25‰之间；海洋浮游植物的$\delta^{13}C$ 一般在-22‰~-18‰之间等(Boutton, 1991; Ku et al, 2007; yu et al, 2010)。

南海(South China Sea, SCS)作为西太平洋最大边缘海，珊瑚礁资源位居全球第八，礁体分布广泛(4°N~21°N)，包括环礁、岛礁和岸礁等多种类型，是珊瑚礁分布的重要海域(余克服, 2012; 余克服, 2018)。礁外坡作为珊瑚礁的主要生物地貌单元，位于礁体外边缘，向海倾斜，是珊瑚长势最好、物种多样性最高的地带，被称为珊瑚生长带(Storlazzi et al, 2005; Zhao et al, 2017)。在南海珊瑚礁生态系统总体退化的背景下，西沙群岛永乐环礁礁外坡珊瑚礁的生态状况相对较好(Zhao et al, 2016; Chen et al, 2019)。因此本文以南海西沙群岛永乐环礁礁外坡表层沉积物作为研究对象，以便代表珊瑚礁生态系统在相对健康状态下的沉积特征，具体测试分析了以下指标：有机碳、氮含量(TOC、TN)和有机碳同位素组成($\delta^{13}C$)，以及沉积物粒度、叶绿素含量等指标，希望为准确评估南海珊瑚礁对碳循环的贡献提供新的信息。

1 材料与方法

1.1 研究地点

永乐环礁由羚羊礁、甘泉岛、珊瑚岛、全富岛、银屿等 13 个珊瑚岛礁及 8 个口门通道，围绕中央泻湖组成，位于海南岛东南部 300km 外，是西沙群岛西部最大的一处环礁(16°26′~16°37′N、111°34′~111°48′E)，属于不连续开放型环礁，呈 NE-SW 走向，长约 22km，宽约 16km(图 1)。

永乐环礁地处东亚季风区的关键位置，冬季(11 月至次年 2 月)盛行东北季风，风力大且连续，夏季(6 月至 10 月)盛行西南季风，风力小且多变(Yang et al, 2015)。海流以风生海流为主，流向和流速随季风而异，永乐环礁的地形成因便与该区域季风海流塑造相关(王国忠, 2006; 晏宏 等, 2010; Zhao et al, 2017)。由于该区域东北季风强于西南季风，环礁地形呈现明显的东西向不对称，东侧礁体宽厚低矮，潟湖水浅、地形复杂，斑礁发育，连片成滩；西侧礁体窄而高，潟湖水深、地形简单，潮汐作用使湖内海水积极交换，造礁条件良好，礁盘内斜坡形成与礁盘外斜坡相似的珊瑚生长带，如甘泉岛东侧、羚羊礁东北测(王国忠, 2006; 赵强, 2010)。

1.2 样品采集

本研究所需样品于 2021 年 7~9 月在南海西沙群岛永乐环礁珊瑚生境取得，采样区域珊瑚生长繁茂，为不破坏生境，表层沉积物样品全部采用水肺潜水员下潜方式采集。共 14 个站位(约表层 0~8cm；图 1c)，均为永乐环礁礁外坡(水深 5~30m)珊瑚礁格架相。所得沉积物样品密封于样品袋内，置于-20℃冰箱中冷冻保存以备实验室分析。

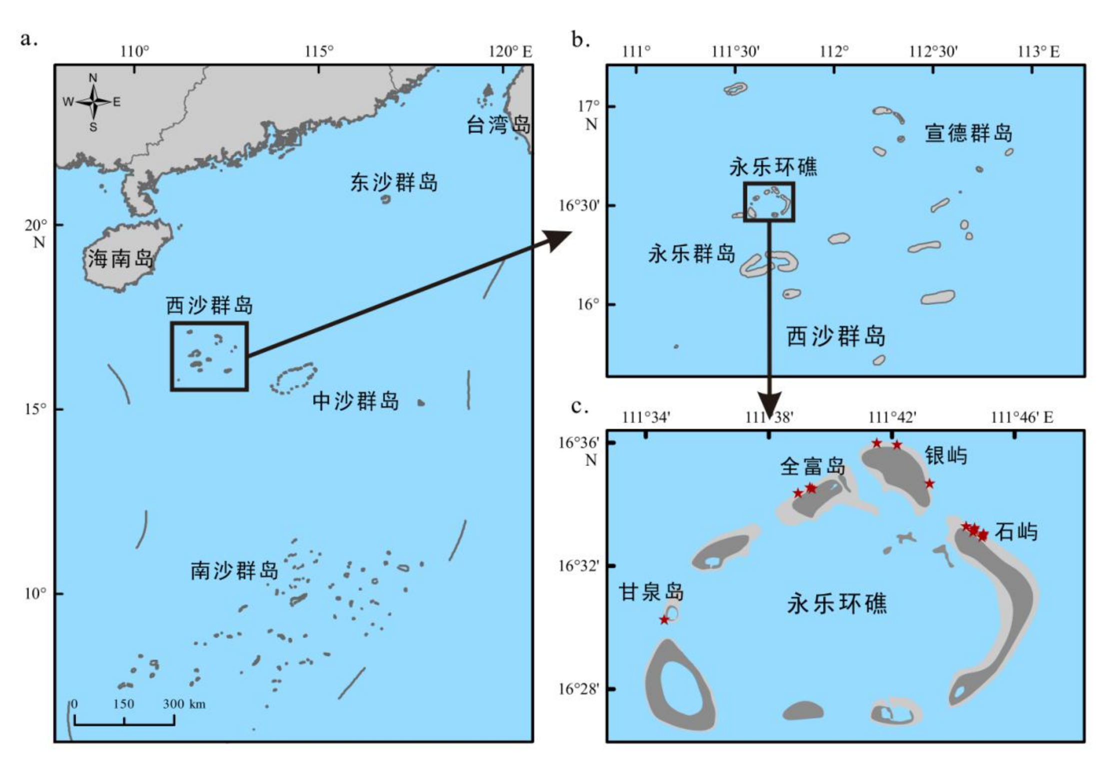


图 1 永乐环礁采样站位

左图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4619 的标准地图制作，底图无修改

Fig. 1 The location of the sampling in the Yongle Atoll. The picture on the left is made based on the standard map No. GS (2020) 4619 downloaded from the standard map service website of the National Bureau of Surveying, Mapping and Geographic Information, without modification of the base map

1.3 实验室分析

1.3.1 沉积物粒度分析

选择孔径为 0.063mm、0.125mm、0.25mm、0.5mm、1mm、2mm 的 6 个网筛，筛分干燥沉积物来确定样品的粒度分布。基于伍登-温特沃斯(Udden-Wentworth)等比制φ值粒级划分标准，分为 3 大类：砾(＞2mm)、砂(2~0.063mm)、粉砂(＜0.063mm)，其中$\varphi = -\log_2 d$(d 单位 mm)。使用 Manus 矩值公式进行沉积物平均粒径、分选系数的计算。

1.3.2 有机碳、氮含量及碳同位素分析

将冷冻干燥的样品研磨均化至可以过 100 目网筛，用 1M 稀 HCl 将样品酸化处理，期间少量多次滴加，滴加至不再产生气泡即可。用 Milli-Q 水洗至中性，期间离心去除上清液，最后将富集的样品冷冻干燥，称量待测。

有机碳、氮含量测试在广西大学海洋学院/珊瑚礁研究中心完成，使用德国 Elementar 公司的元素分析仪(vario MACRO cube)测定，使用磺胺(Sulfanilamid)作为标样，测试结果通过质量换算进行矫正，获得沉积物样品中有机碳含量，精度≤0.01%。有机碳同位素的测试在自然资源部第三海洋研究所完成，使用美国 Thermo Fisher Scientific 公司的元素分析-同位素比值质谱联用仪器（Flash EA 1112 - ConFlo IV - Delta V Plus IRMS）测定，实验室内标为乙酰苯胺(ACET; $\delta^{13}C$=26.85±0.1‰)、咖啡因(IAEA-600; $\delta^{13}C$=-27.77±0.05‰)，精度≤0.06‰，测试结果使用国际标准样品($\delta^{13}C$V-PDB)校正。重复 2 次，取平均值。

1.3.3 沉积物叶绿素含量分析

取冻干研磨后样品，加入 90%的丙酮，超声萃取 15min。于 4℃冰箱，避光抽提 20h，期间震荡 2 次。最后离心取上清液待测(李万会, 2006)。

测试在广西大学海洋学院/珊瑚礁研究中心完成，通过岛津紫外可见分光光度计分析样品，标准样品为 90%丙酮溶液，待测样品置于 1cm 的比色皿中，分别在 750nm、665nm 波长处测定吸光度。之后滴加 1~2 滴 0.5M 稀 HCl，酸化萃取液，轻晃 1~2min，再次读取 750nm、665nm 处的吸光度。最后使用 Lorenzen 的公式计算叶绿素 a 浓度与脱镁叶绿素含量(Lorenzen, 1967)。

1.4 统计分析

利用 Origin2021、Arcgis10.8 进行图表分析，利用 SPSS22.0 进行数据分析。采用 Pearson 相关性分析用于描述参数之间的相关性。统计的显著性水平设置为 0.05($p<0.05$)。所有数据均以平均值±标准偏差(SD)表示。

2 结果

2.1 沉积物粒度

砂质为永乐环礁礁外坡的主要底质类型，含量高达 84.81~97.62%，平均为 92.43±3.89%，且主要集中在粗砂和中砂；粉砂含量平均为 0.57±0.42%，在水深处分布较多(图 2)。沉积物平均粒径介于 0.25~1.13φ之间(φ值越小，沉积物越粗)，平均为 0.73±0.28φ，总体粒度较粗，其中银屿礁外坡沉积物粒度最粗(图 2; 表 1)。永乐环礁沉积物分选性中等到较差，多为较差。Pearson 相关性分析发现，永乐环礁礁外坡沉积物的平均粒径与水深具有显著的正相关关系($R=0.58$, $P<0.05$; 图 2; 表 2)，表明水浅处的上礁坡沉积物具有较粗的粒度。

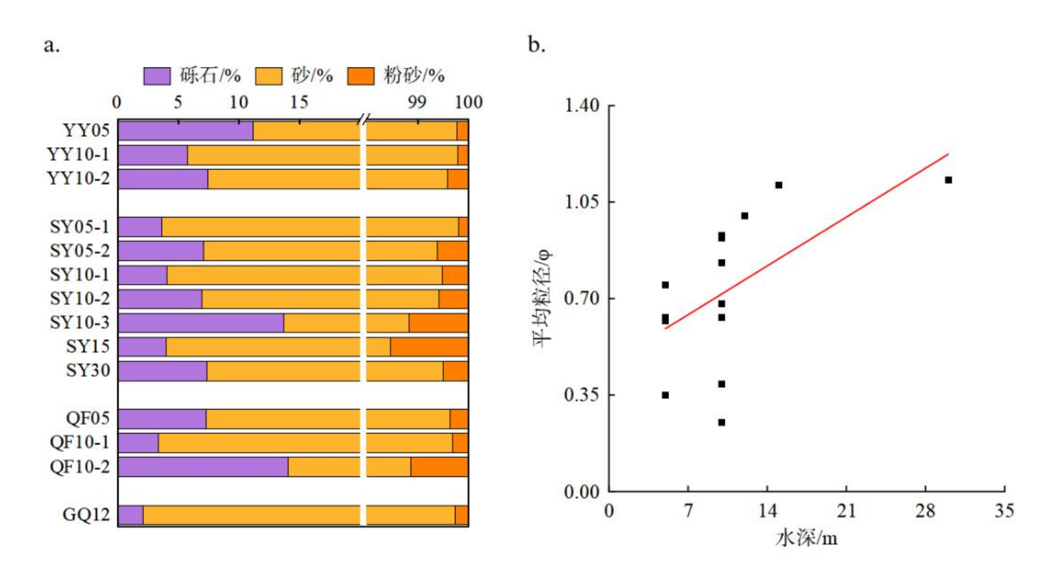


图 2　沉积物的粒度组成(a)以及平均粒径与水深的关系(b)

Fig. 2　Particle size composition of sediments (a) and the relationship between average particle size and water depth (b)

表 1　各岛礁礁外坡沉积物参数

Tab. 1　Sediment parameters of outer slopes of each island reef

	TOC/(mg·g⁻¹)	TN/(mg·g⁻¹)	C/N	δ¹³C/‰	Chl a/(μg·g⁻¹)	Pheo/(μg·g⁻¹)	平均粒径/φ	粉砂含量/%	n
银屿	1.43±0.13	0.22±0.03	6.98±0.54	-16.44±0.33	4.71±1.57	2.40±0.89	0.60±0.24	0.28±0.11	3
石屿	1.21±0.31	0.20±0.05	6.62±0.31	-16.80±0.55	3.64±2.32	2.08±0.78	0.78±0.31	0.73±0.46	7
全富岛	1.15±0.48	0.18±0.07	6.87±0.17	-16.25±0.37	2.29±1.30	2.17±1.59	0.65±0.27	0.61±0.60	3
甘泉岛	0.99	0.16	6.75	-16.92	2.18	2.00	1.00	0.26	1
总计	1.23±0.31	0.20±0.05	6.75±0.34	-16.61±0.49	3.48±1.99	2.16±0.90	0.73±0.28	0.57±0.42	14

表 2　永乐环礁礁外坡沉积物参数之间的相关性

Tab. 2　Correlation of sediment parameters on outer slopes of Yongle Atoll

	TOC/(mg·g⁻¹)	TN/(mg·g⁻¹)	C/N	δ¹³C/‰	Chla/(μg·g⁻¹)	Pheo/(μg·g⁻¹)	平均粒径/φ	粉砂含量/%	水深/m
TOC/(mg·g⁻¹)	1								
TN/(mg·g⁻¹)	0.98***	1							
C/N	0.06	-0.16	1						
δ¹³C/‰	0.08	-0.04	0.54*	1					
Chla/(μg·g⁻¹)	0.75**	0.74**	0.10	0.03	1				
Pheo/(μg·g⁻¹)	0.78**	0.73**	0.21	0.42	0.73**	1			
平均粒径/φ	-0.59*	-0.54*	-0.21	-0.07	-0.38	-0.23	1		
粉砂含量/%	-0.10	-0.07	-0.16	-0.11	-0.43	-0.30	-0.05	1	
水深/m	-0.56*	-0.54*	-0.08	-0.44	-0.49	-0.55*	0.58*	0.21	1

注: *指在 0.05 级别(双尾)相关性显著; **指在 0.01 级别(双尾)相关性显著; ***指在 0.001 级别(双尾)相关性显著

2.2 沉积物有机碳、氮含量及碳同位素值

南海永乐环礁礁外坡表层沉积物有机碳含量(TOC)含量在 0.71~1.66mg·g^{-1} 之间，平均为 1.23±0.31mg·g^{-1}；氮(TN)含量在 0.12~0.28mg·g^{-1} 之间，平均为 0.20±0.05mg·g^{-1}。从空间分布看，TOC(及 TN)含量在永乐环礁东北部的银屿礁外坡最高，石屿次之(图 3a; 表 1)。此外，水浅处的上礁坡要比下礁坡具有更高的 TOC(及 TN)含量，Pearson 相关性分析发现，TOC(及 TN)含量与水深相关性显著(TOC: $R=-0.56$, $P<0.05$; TN: $R=-0.54$, $P<0.05$; 图 4a, b; 表 2)。

经 TOC 与 TN 的线性关系校正，C/N 比值的变化范围为 6.16~7.59，平均为 6.75±0.34。碳同位素$\delta^{13}C$ 的变化范围为-17.49~-15.85‰，平均为-16.61±0.49‰。Pearson 相关性分析发现，TOC 含量与 TN 含量相关性显著($R=0.98$, $P<0.001$; 图 3b; 表 2)，且 C/N 与$\delta^{13}C$ 值呈正相关关系($R=0.54$, $P<0.05$; 图 5; 表 2)，显示了 TOC 与 TN 具有较强的同源性。

2.3 沉积物叶绿素含量

永乐环礁表层沉积物叶绿素 a (chlorophyll a, Chl a) 含量介于 0.90~8.01μg·g^{-1} 之间，平均为 3.48±1.99μg·g^{-1}；沉积物脱镁叶绿素 (pheophytin, Pheo) 含量介于 0.83~3.98μg·g^{-1} 之间，平均为 2.16±0.90μg·g^{-1}。Pearson 相关性分析表明，叶绿素含量(Chl a, Pheo)与水深存在中等负相关关系(Chl a: $R=-0.49$, $P=0.08$; Pheo: $R=-0.55$, $P<0.05$; 表 2)。此外，TOC 含量与 Chl a、Pheo 含量都具有显著强相关关系(Chl a: $R=0.75$, $P<0.01$; Pheo: $R=0.78$, $P<0.01$; 图 4c, d; 表 2)，显示了叶绿素含量指示的初级生产力对有机碳含量的影响。

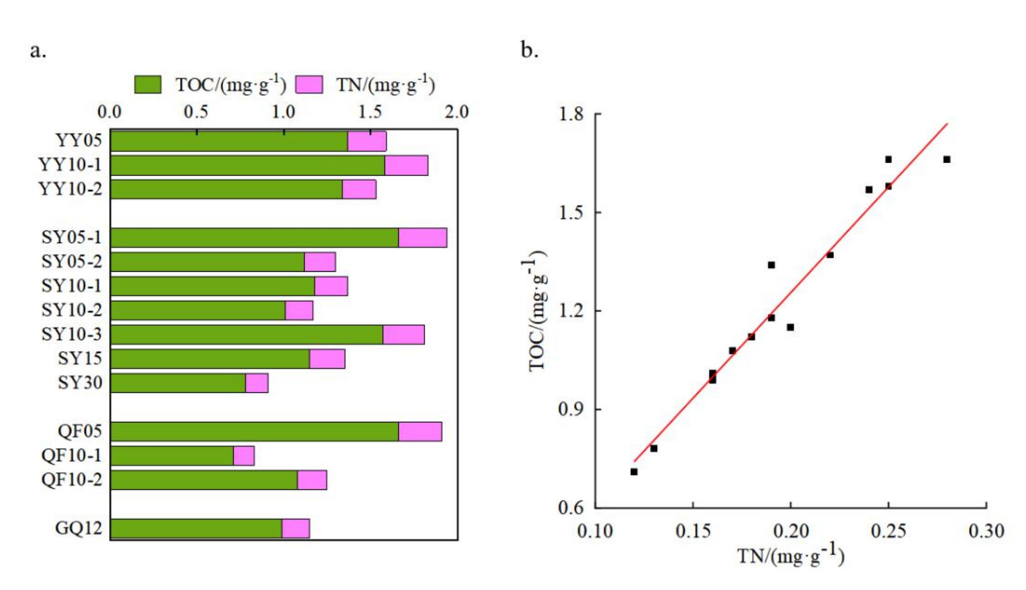


图 3 沉积物 TOC、TN 的含量分布(a)，以及 TOC 与 TN 的关系(b)

Fig. 3 Content distribution of TOC and TN in sediments (a), and the relationship between TOC and TN (b)

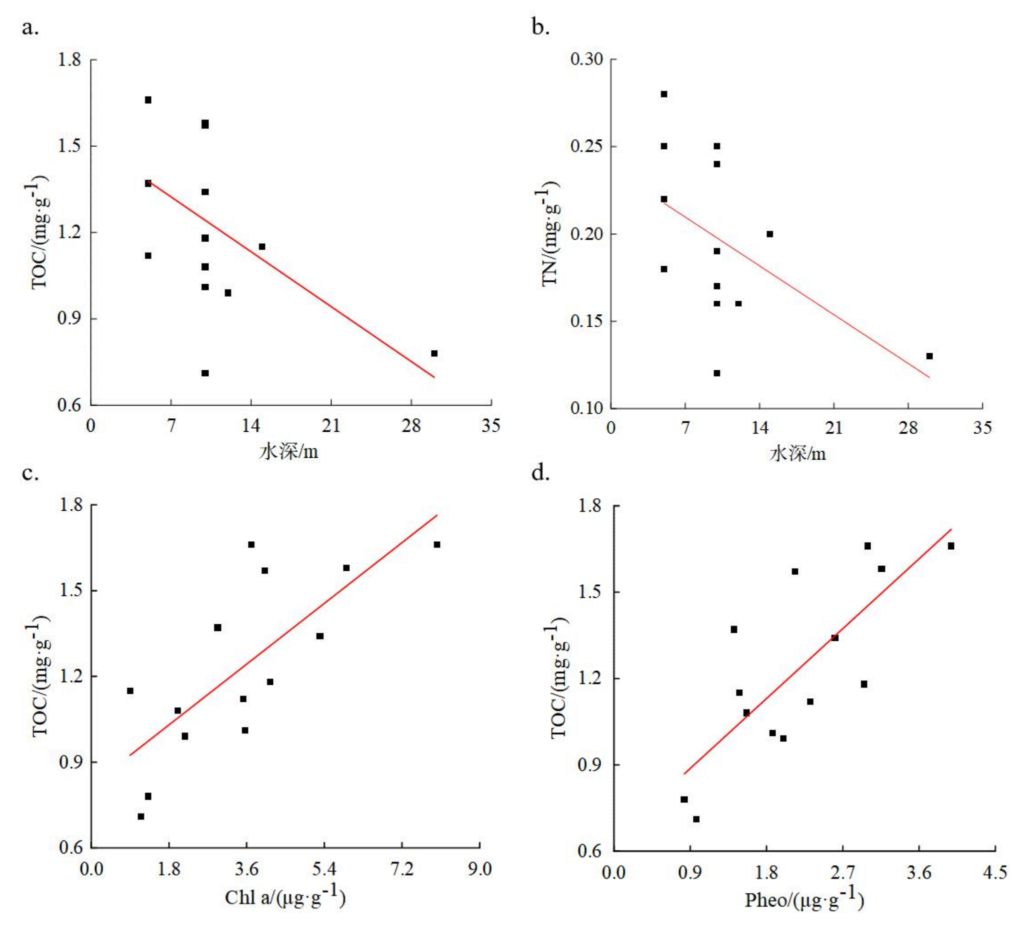


图 4　TOC 与水深的关系(a)，TN 与水深的关系(b)，TOC 与 Chl a 的关系(c)，TOC 与 Pheo 的关系(d)

Fig. 4　Relationship between TOC and water depth (a), TN and water depth (b), TOC and Chl a (c), TOC and Pheo (d)

3　讨论

3.1　永乐环礁礁外坡沉积物 TOC 含量对珊瑚礁碳循环的代表意义

基于 14 个礁外坡现代表层沉积物样品，本文首次报道了南海(SCS)永乐环礁礁外坡沉积物中有机碳(TOC)的含量，在 0.71~1.66mg·g^{-1}之间，平均为 1.23±0.31mg·g^{-1}。与前人研究相比(表 3)，永乐环礁礁外坡沉积物中的 TOC 含量相对偏低。

Miyajima 等(1998)认为礁砂中的 TOC 含量通常小于 2mg·g^{-1}~4mg·g^{-1}，反映了主要来自珊瑚、有孔虫和钙质藻类碳酸盐骨骼中所含碳量的背景水平。Sorokin (1995b)认为珊瑚砂中的 TOC 含量通常小于 3mg·g^{-1}~6mg·g^{-1}，很少超过 10mg·g^{-1}。尽管前人对珊瑚礁 TOC 含量进行了调查，但上述指标相对宽泛，尚不清楚它们的代表性如何。因此本文选取西沙群岛永乐环礁礁外坡的表层沉积物，以代表珊瑚礁生态系统在相对较好生态状况下的沉积特征(Zhao et al, 2016)。如表 3 所示，本文采样站位的 TOC 含量在 0.71~1.66mg·g^{-1}之间，低于 2mg·g^{-1}，与许多健康珊瑚礁生态系统相似，如印度 Agatt 岛、澳大利亚大堡礁以及法属波利尼西亚 Moorea 岛等珊瑚繁茂地带(Schrimm et al, 2004; Alongi et al, 2008; Shekhar et al, 2019)。健康珊瑚礁群落相对较低的 TOC 埋藏，与珊瑚生活在低营养、相对清澈海域的环境条件密不可分，珊瑚礁生态系统需要通过紧密的有机质再循环为群落提供源源不断地养分(Schrimm et al, 2004; Miyajima et al, 2007)。研究表明珊

瑚释放的粘液是使该群落可以在贫营养环境中回收能量和营养的重要因素(Wild et al, 2004)。珊瑚黏液虽能够捕获海水中的悬浮物质从而加速颗粒有机质沉入海底(Wild et al, 2005)，但它同时含有大量微生物，是海水中的 100 倍，氧化消耗速率可达 130~445μmol·L^{-1}·d^{-1}，而海水中仅为 5~41μmol·L^{-1}·d^{-1}(Hung et al, 2003)。珊瑚脱落的粘液会使附近的沉积物富含有机物和微生物，再加上珊瑚砂上层通气和光照良好，适合微型藻类、细菌和微型底栖动物等的栖息，使珊瑚砂成为珊瑚礁生态系统中最活跃的区域之一，最终导致有机物被大量矿化(Sorokin, 1995b; Sorokin, 1995a)。此外，营养物质和有机碳的大幅升高是驱动珊瑚疾病和死亡的原因之一(Kaczmarsky and Richardson, 2011)。有机物的再循环可以为群落提供营养，若产生大量的营养物质，特别是与温度升高相结合，对珊瑚健康有显著影响(Kaczmarsky and Richardson, 2011; Page et al, 2023)，因此相对较低的 TOC 含量更有利于珊瑚的生长。

与之相反，退化的珊瑚礁群落可能具有更高的 TOC 含量，如表 3 所示，沿岸海湾区、菲律宾 Negros 岛等珊瑚覆盖度较低或爆发疾病的珊瑚礁群落的 TOC 含量与采样站位相比要高得多(Schrimm et al, 2004; Kaczmarsky and Richardson, 2011; 林武辉 等, 2021)。研究表明粉砂和粘土质沉积物以及营养丰富的沉积物会对珊瑚造成压力，而砂质沉积物或营养贫乏的沉积物对珊瑚的影响较小(Yogesh Kumar et al, 2014)。沿岸营养物质的输入对珊瑚礁新陈代谢的影响已被指出是造成岸礁具有相对较高有机物生产率的原因(Suzuki and Kawahata, 2003; Suzuki and Kawahata, 2004)。即使添加少量的营养素，也可能通过促进浮游植物和底栖藻类的生长，导致珊瑚礁群落结构发生重大变化(Riegl et al, 2015)，最终使沉积物中有机碳含量增高(Jaikumar, 2010; Yogesh Kumar et al, 2014)。这是由于海草、大型藻类等主导的珊瑚礁沉积物中通常富含有机质(Miyajima et al, 1998; Atwood et al, 2018)。同时，相较于细菌对珊瑚分泌物及浮游植物等有机物的分解，海草、草皮藻以及大型藻类的 C/N 比值较高，营养质量较低，含有较高的难降解有机质(Nicolas and Pergent, 2006; Umezawa et al, 2008; Fey et al, 2020)。因此在以珊瑚为主的健康珊瑚礁群落中沉积物中的 TOC 含量普遍较低，而当 TOC 含量较高时珊瑚礁群落可能存在群落结构相变和(或)富营养化的风险。

Watanabe and Nakamura (2019)统计表明，珊瑚礁生态系统沉积物中的有机碳含量通常低于红树林、海草床等陆架生态系统，是红树林的 1/18，海草床 1/2~1/5。陈小花等(2022)对海南东寨港红树林表层土壤的调查显示，不同红树林群落的 TOC 含量介于 6.57~74.87mg·g^{-1}之间。杨熙等(2022)对海南黎安港海草床表层沉积物的调查显示，TOC 含量介于 2~11.9mg·g^{-1}之间。此外，刘松林等(2017)对全球 51 个海草床区域的 TOC 含量汇总发现，全球海草床 TOC 的平均含量为 15mg·g^{-1}，其中约 70%海草床 TOC 含量小于 15mg·g^{-1}。因此在典型的浅海生态系统中 TOC 埋藏量大致存在珊瑚礁<海草床<红树林的趋势。这种差异不仅来自有机质的供应，也来自沉积物中有机质的分解和保存方式的差异。由于珊瑚礁系统沉积物具有颗粒尺寸较大、高渗透性的特征，其顶部几厘米可以通过孔隙水平流获得氧气，促进表层沉积物中的 TOC 矿化，最终使礁体沉积物维持在低 TOC 含量水平(Werner et al, 2006)。

前人常将有机地球化学指标作为指示珊瑚礁健康程度的有力工具(Umezawa et al, 2008; Kaczmarsky and Richardson, 2011; Vaughan et al, 2021)。受营养条件及高效碳循环的控制，珊瑚更适宜在相对低有机碳的环境中生存，本文 TOC 含量处于相对较低水平，显示了永乐环礁未出现富营养化现象，适宜珊瑚生长。综上永乐环礁礁外坡的生态状况相对较好，TOC 含量代表了健康珊瑚礁砂质碳酸盐沉积物中有机碳含量的基础背景值。

表 3　不同区域珊瑚礁沉积有机碳含量比较

Tab. 3　Comparison of sediment organic carbon content of coral reefs in different regions

	TOC/(mg·g⁻¹)	参考文献
中国南海永乐环礁	0.6~1.7	本研究
印度 Agatti 岛	0.2~2.4	(Shekhar et al, 2019)
澳大利亚大堡礁	1.5~4.1	(Alongi et al, 2008)
法属波利尼西亚 Moorea 岛珊瑚繁茂区	1.1~3.0	(Schrimm et al, 2004)
法属波利尼西亚 Moorea 岛靠近海湾区	3.0~35.5	(Schrimm et al, 2004)
菲律宾 Negros 岛珊瑚疾病爆发区	1.4~157.8	(Kaczmarsky and Richardson, 2011)
中国北部湾涠洲岛	4.6~5.5	(林武辉　等, 2021)

3.2　底栖植物是永乐环礁沉积有机碳的主要来源

结果显示，永乐环礁礁外坡沉积物的 C/N 比值在 6.16~7.59 之间，平均为 6.75±0.34；$\delta^{13}C$ 值在-17.49~-15.85‰之间，平均为-16.61±0.49‰。与开阔海洋中的深海沉积物相比，两者 C/N 比值相似，但珊瑚礁沉积物中的$\delta^{13}C$ 值要比开阔海洋(平均值为-21.0‰±0.7‰)高得多(陈芬　等, 2023)。

海洋沉积有机碳的来源可粗略划分为陆源输入和海源输入，不同来源的有机碳其化学组成存在明显差异(Ge et al, 2007; Briand et al, 2015)。研究显示，沉积物的 C/N 比和$\delta^{13}C$ 可以作为溯源沉积有机碳来源的重要指标，由于海洋植物富含蛋白质，一般将 C/N 比小于 8 的海洋沉积物判断为海源占主要优势(Bordovskiy, 1965)；C/N 比大于 12 判断为陆源占主要优势(Prahl et al, 1980; Lamb et al, 2006; Ku et al, 2007; Yu and Zhang, 2017; Xia et al, 2022)。同时，由于海洋植物光合作用利用的溶解无机碳($\delta^{13}C$ 为 0‰)比陆地植物利用的大气 CO_2($\delta^{13}C$ 为-7.8‰)偏重，使海源$\delta^{13}C$ 相对于陆源$\delta^{13}C$ 正偏(O'Leary, 1988)。如在雷州半岛与大亚湾，前人将-19.0‰与-26.0‰作为海源与陆源的$\delta^{13}C$ 端元值(Baoxiao et al, 2018; Xia et al, 2022)；在湛江湾前人将-20.8‰与-27.0‰作为海洋与陆地的端元值(陆旋, 2020)。在本文研究区域中，沉积物的 C/N 比在 6.16~7.59 之间，远低于陆地植被的 C/N 比，$\delta^{13}C$ 值在-17.49~-15.85‰之间，远高于陆地端元值，表明研究区域的沉积有机碳以海洋自生有机碳来源为主，未收到陆源物质影响。

然而有前人表明海洋沉积物的低 C/N 比可能来源于无机氮(TIN)的影响，我们需要评估 TIN 对 TN 的影响程度(Yu and Zhang, 2017)。TOC 与 TN 的线性关系被广泛用于判断沉积环境中 TIN 的恒定背景(Kienast et al, 2005)。结果显示研究区域 TOC 与 TN 空间分布相似，两者之间存在显著的正相关关系(R=0.98，P<0.001; 表 2)，表明来源的同源性。当 TOC 为零时，TN 的截距接近为零(0.013 $mg\cdot g^{-1}$)，表明大部分 TN 是有机氮，TIN 不是使 C/N 比低的主要原因。此外，C/N 比和$\delta^{13}C$ 还可能受到早期成岩作用的影响，由于富含氮的蛋白质($\delta^{13}C$ 偏重)更易降解，使 C/N 值升高，$\delta^{13}C$ 降低(陈芬　等, 2023)。本研究区域样品的$\delta^{13}C$ 与 C/N 呈正相关，而与 TOC(及 TN)无明显相关性(表 2)，表明早期成岩降解对 C/N 和$\delta^{13}C$ 的影响是不显著的，两者皆可指示有机物的来源。

为了更直观的对研究区域有机碳来源进行判断，本文进一步总结了前人在太平洋中、西部珊瑚礁区测量的底栖植物与浮游植物的 C/N 和$\delta^{13}C$ 值(表 4)，并作 C/N 与$\delta^{13}C$ 的关系图来对海洋有机碳类型进行区分(图 5)。如表 4 所示，底栖植物相对于浮游植物具有较高的$\delta^{13}C$ 值。前人表明

这是由于底栖植物在光合作用中吸收了更多碳同位素重的 HCO^{3-}(Raven et al, 2002)。显然，研究区域永乐环礁沉积物的 C/N 和$\delta^{13}C$ 处于底栖植物的端元范围(图 5)，表明底栖植物来源是永乐环礁沉积有机碳的主要来源。珊瑚礁作为“海洋中的热带雨林”，与开阔海洋相比具有十分丰富的底栖群落结构(赵美霞 等, 2006; 余克服, 2018)。海草、草皮藻以及大型藻对沉积有机碳的贡献在前人的研究中已得到过证实，这归因于其较高的营养循环和初级生产，以及自身结构导致的数月或者数年才能降解的低降解率，使其在沉积物中长期储存(Nicolas and Pergent, 2006; Umezawa et al, 2008; Fey et al, 2020)。此外前人于珊瑚礁施放沉积物捕获器发现有 93%以上的颗粒有机碳在进入沉积物之前被再循环，这可能解释了沉积物中浮游植物来源有机碳较少的原因(宋金明 等, 2003)。因此通过 C/N 比值与$\delta^{13}C$ 值可以得出永乐环礁未受到陆源物质的影响，沉积物中的有机碳以海源为主，且主要来自于底栖植物。

表 4　不同有机质来源的 C/N 和$\delta^{13}C$ 值(Yamamuro et al, 1995; Wyatt et al, 2013; Briand et al, 2015; Fey et al, 2020; Blanckaert et al, 2020;Vaughan et al, 2021; **许慎栋 等**, 2021)

Tab. 4　C/N and $\delta^{13}C$ values for different organic matter sources

有机质来源	C/N	$\delta^{13}C$
陆地植物	11.9~19.1	-31.2 ~ -27.0
浮游植物	4.0~6.2	-18.1~-22.0
大型藻类	5.8~10.0	-19.4~-8.7
草皮藻	8.3~10.6	-19.5~-18.4
珊瑚虫黄藻	9.9~10.5	-14.7~-11.9

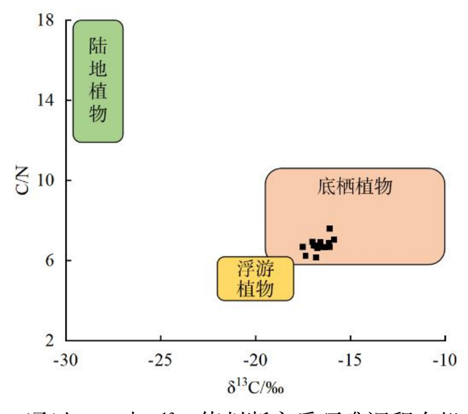


图 5　通过 C/N 与$\delta^{13}C$ 值判断永乐环礁沉积有机碳来源

Fig. 5　Determining the source of sedimentary organic carbon in Yongle Atoll by C/N and $\delta^{13}C$ values

3.3　初级生产力决定珊瑚礁礁外坡 TOC 的产量

在永乐环礁礁外坡沉积物中，TOC 含量与水深呈现显著的负相关关系，与沉积物中的叶绿素含量(Chl a, Pheo)呈现极显著的正相关关系(图 4; 表 2)，且从空间分布来看，永乐环礁东北部的银屿礁外坡具有较高的 TOC 含量，其次是石屿(表 1)。

如前文所述，礁外坡表层沉积物以海洋底栖植物来源为主，所以有必要讨论珊瑚礁群落初级生产力与 TOC 含量之间的关系。水深的变化通过影响植物光合速率、植物丰度以及沉积物堆积

率等对 TOC 含量产生综合影响，研究表明水深较深的地点辐照度较低，有机碳含量较低(Serrano et al, 2014; Samper-Villarreal et al, 2016)。样品 TOC 含量与水深的负相关关系，显示了水深调控下的群落初级生产力可能对 TOC 含量产生重要影响。同时，植物色素可以作为碎屑物质存在于活的/死的海洋植物以及动物粪便颗粒中，与硅酸盐、陆源等沉积物相比碳酸盐沉积物中的叶绿素浓度更高(Rasheed et al, 2011)。底栖微藻是珊瑚礁生态系统的关键组成部分，沉积物中的 Chl a 作为衡量底栖微藻现存丰度的良好指标，多用来估算初级生产力，而 Pheo 作为植物 Chl a 的降解产物，同样具有指示生产力的作用(Heil et al, 2004; Sanders et al, 2012)。因此 TOC 含量与叶绿素含量的关系进一步证明了群落初级生产力决定永乐环礁礁外坡 TOC 的含量。此外，从空间分布来看，东亚季风影响了永乐环礁的地貌发育，也使得永乐环礁东北部站位获得更好的水质量交换，能够接收更多的外来营养物质，具有积极的碳循环功能，从而促进了群落初级生产力。

沉积物的粒度特征可以反演影响沉积物粒度变化的环境因素，尤其是物质来源和水动力情况(McLaren and Bowles, 1985; 余克服 等, 1995; 肖晓 等, 2016)。研究区域礁外坡粒度与水深的正相关关系，显示了礁外坡水浅处具有更强的的水动力条件(图 2b; 表 2)。大量研究显示水动力平缓有利于颗粒物沉积，细粒含量丰富有利于有机质保存(Köster and Meyer-Reil, 2001; 韩永强 等, 2020)。然而在永乐环礁礁外坡却显示出相反的结果，水深较浅的站位粒度较粗，水动力较强，但同时具有较高的有机质含量和叶绿素含量(图 4; 表 2)。Rasheed 等(2011)研究表明珊瑚礁碳酸盐沉积物的多孔隙结构能够捕捉更多的植物碎屑。尹桂金和严岩(2012)表明粒度粗的底质具有光透过率高、颗粒间空隙大的特征，能够更适合藻类的生长。同时，前人对永乐环礁藻类覆盖度的调查中也显示了，永乐环礁上礁坡比下礁坡具有更高的藻类覆盖度(Zhao et al, 2016)，与本研究结果具有很好的对应性。因此珊瑚礁区水浅处虽然水动力较强，但更适合藻类生长，具有更多的有机碳来源。沉积动力条件不是控制永乐环礁礁外坡 TOC 含量的主要因素，推测礁外坡有机碳含量主要由初级生产力决定。

3.4　珊瑚礁具有潜在的有机碳汇能力

鉴于前人通过 AMS^{14}C 测年得到的永乐环礁 3500 年以来的平均沉积速率 1.27mm·a^{-1}(Yue et al, 2019)，以及珊瑚砂的平均干密度 1.24g·cm^{-3}(荀涛 等, 2009)，本文用于估算有机碳埋藏通量(=沉积速率×干密度×TOC)。根据确定的有机碳含量，永乐环礁的有机碳埋藏通量约在 1.12~2.61g·m^{-2}·a^{-1} 之间，平均为 1.93±0.49g·m^{-2}·a^{-1}。

有机碳埋藏通量的估算能够提高我们对珊瑚礁有机碳汇能力的整体认识。Yan 等(2018)对永乐环礁海气 CO_2 通量的调查中发现，石屿礁外坡的海气 CO_2 通量为 3.94g·m^{-2}·a^{-1}，甘泉岛河道坡的海气 CO_2 通量为 5.26g·m^{-2}·a^{-1}。从海气通量来看，永乐环礁向大气释放 CO_2，然而若考虑永乐环礁有机碳输出对 CO_2 的吸收能力，本文调查的永乐环礁礁外坡有机碳埋藏通量能够抵消约 1/5~1/3 的 CO_2 释放量。且目前尚未考虑永乐环礁有机碳的水平输出通量。Yang 等(2011)对渚碧礁的调查发现，POC 向公海的净出口流量为 5.11g·m^{-2}·a^{-1}。因此虽然珊瑚礁属于典型的钙化系统，但其有机碳汇能力对衡量珊瑚礁碳循环功能具有重要作用。

本文对永乐环礁礁外坡有机碳埋藏通量的估算值小于大堡礁 Herbert 河段珊瑚礁有机碳埋藏通量(9.6g·m^{-2}·a^{-1}; Brunskill et al, 2002)，推测与大堡礁能够接收更多河流物质输送有关。与部分区域的海草床生态系统相近，如波罗的海南部 Gdansk 湾海草床(0.84~3.85g·m^{-2}·a^{-1}; Jankowska et al, 2016)，西澳大利亚州南部海岸 Oyster 港海草床(平均 3.45g·m^{-2}·a^{-1}; Rozaimi et al, 2016)。但与全球海草床平均碳埋藏速率(138.00g·m^{-2}·a^{-1})相比要低得多(McLeod et al, 2011)。无论海草床或是珊瑚

礁系统，不同因素的相互作用使有机碳埋藏在不同环境中发挥着特定的变化(Cartapanis et al, 2016)，如大堡礁潟湖背风面存在碳酸盐泥带，TOC 埋藏量约为永乐环礁礁外坡的 4 倍(Alongi et al, 2006)；马达加斯加西南海岸封闭泻湖 TOC 含量最高，高碳酸盐相沉积物中 TOC 含量最低(Thomassin and Cauwet, 1985)。因此虽然永乐环礁礁外坡有机碳埋藏通量偏低，但结合前人研究，潟湖以及近岸等区域可能会有更高的有机碳埋藏通量。再加上珊瑚礁面积广阔，全球面积达 61.7 万平方千米(Smith, 1978)，是红树林全球面积的 4.5 倍(13.7 万平方千米; Giri et al, 2011)，与海草床相似或更多(30-60 万平方千米; Claude and Sournia, 1990; Duarte et al, 2005)。因此综合来看，珊瑚礁生态系统具有潜在的有机碳汇能力，今后仍需进一步加强对珊瑚礁有机碳埋藏量的监测分析。

4　结论及展望

本文通过对南海西沙群岛永乐环礁礁外坡沉积物的调查和分析，得出以下结论：

1）有机碳含量在 0.71~1.66mg·g^{-1} 之间，平均为 1.23±0.31mg·g^{-1}；氮含量在 0.12~0.28mg·g^{-1} 之间，平均为 0.20±0.05mg·g^{-1}。

2）C/N 比值在 6.16~7.59 之间，平均为 6.75±0.34，δ^{13}C 值在-17.49~-15.85‰之间，平均为-16.61±0.49，揭示了永乐环礁未受到陆源物质的影响，有机碳以海源为主，且主要来自底栖植物贡献。

3）有机碳含量与水深负相关，与叶绿素 a 和脱镁叶绿素含量正相关，推测礁外坡有机碳含量主要由初级生产力决定。

4）永乐环礁礁外坡有机碳埋藏通量约在 1.12~2.61g·m^{-2}·a^{-1} 之间，平均为 1.93±0.49g·m^{-2}·a^{-1}，具有潜在的有机碳汇能力。

参考文献 References

韩永强，夏嘉，谭靖千，等, 2020. 环雷州半岛近海表层沉积物有机碳分布及其控制因素分析[J]. 海洋科学, 44(3): 93-103. HAN YONGQIANG, XIA JIA, TAN JINGQIAN, et al, 2020. Distribution and controlling factors of organic carbon in surface sediments of the coastal region surrounding Leizhou Peninsula [J]. Marine Sciences, 44(3): 93-103. (in Chinese with English abstract).

陈芬，黎刚，朱小畏，等, 2023. 南海南沙海区沉积有机质分布特征及其指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 43(2): 45-54. CHEN FEN, LI GANG, ZHU XIAOWEI, et al, 2023. Spatial distribution of organic matter in surface sediments from the Nansha sea area of the South China Sea and its implications for marine productivity and monsoon[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 43(2): 45-54. (in Chinese with English abstract).

陈小花，陈宗铸，雷金睿，等, 2022. 东寨港红树林中不同群落区表层土壤有机碳及其活性组分含量[J]. 湿地科学, 20(4): 499-506. CHEN XIAOHUA, CHEN ZONGZHU, LEI JINRUI, et al, 2022. Contents of organic carbon and Its active components in surface soil of different community areas of mangrove forest in Dongzhai Port[J]. Wetland Science, 20(4): 499-506. (in Chinese with English abstract).

焦念志，刘纪化，石拓，等, 2021. 实施海洋负排放践行碳中和战略[J]. 中国科学：地球科学, 51(4): 632-643. JIAO NIANZHI, LIU JIHUA, SHI TUO, et al, 2021. Deploying ocean negative carbon emissions to implement the carbon neutrality strategy[J]. Scientia Sinica Terrae, 51(4): 632-643. (in Chinese with English abstract).

李万会, 2006. 潮滩湿地沉积物中叶绿素 a 浓度的变化特征及其与沉积物特性间的关系初探[D]. 上海: 华东师范大学: 20-27. LI WANHUI, 2006. Primary study on relation between variation of chlorophyll a concentration and sediment grain size on an intertidal flat[D]. Shanghai: East China Normal University: 20-27. (in Chinese with English abstract).

林武辉, 余锦萍, 余克服, 等, 2021. 北部湾涠洲岛海域沉积物中物质来源解析——来自元素、稳定同位素、放射性核素的证据[J]. 沉积学报, 39(3): 621-630. LIN WUHUI, YU JINPING, YU KEFU, et al, 2021. Source identification in a 210pb-dated sediment core near southwest Weizhou Island, Beibu Gulf：Evidence from elements, stable isotopes, and radionuclides[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 39(3): 621-630. (in Chinese with English abstract).

刘松林, 江志坚, 吴云超, 等, 2017. 海草床沉积物储碳机制及其对富营养化的响应[J]. 科学通报, 62(28-29): 3309-3320. LIU SONGLIN, JIANG ZHIJIAN, WU YUNCHAO, et al, 2017. Mechanisms of sediment carbon sequestration in seagrass meadows and its responses to eutrophication[J]. Chin Sci Bull, 62(28-29): 3309-3320. (in Chinese with English abstract).

陆旋, 2020. 南海西北部颗粒物碳、氮稳定同位素的研究[D]. 广东: 广东海洋大学: 43-44. LU XUAN, 2020. Stable carbon and nitrogen isotopes of particulate matter in the northwest South China Sea[D]. Guangdong: Guangdong Ocean University: 43-44. (in Chinese with English abstract).

石拓, 郑新庆, 张涵, 等, 2021. 珊瑚礁：减缓气候变化的潜在蓝色碳汇[J]. 中国科学院院刊, 36(3): 270-278. SHI TUO, ZHENG XINQING, ZHANG HAN, et al, 2021. Coral reefs: Potential blue carbon sinks for climate change mitigation[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 36(3): 270-278. (in Chinese with English abstract).

宋金明, 赵卫东, 李鹏程, 等, 2003. 南沙珊瑚礁生态系的碳循环[J]. 海洋与湖沼, 34(6): 586-592. SONG JINMING, ZHAO WEIDONG, LI PENGCHENG, et al, 2003. carbon cycling in Nansha coral reef ecosystem South China Sea[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 34(6): 586-592. (in Chinese with English abstract).

王国忠, 2006. 南海珊瑚礁区沉积学[M]. 北京: 海洋出版社: 157-170. WANG GUOZHONG, 2006. Sedimentology of coral reef area in South China Sea[M]. Beijing: Ocean Press: 157-170. (in Chinese with English abstract).

肖晓, 石要红, 冯秀丽, 等, 2016. 北部湾表层沉积物粒度分布规律及沉积动力分区[J]. 中国海洋大学学报：自然科学版, 46(5): 83-89. XIAO XIAO, SHI YAOHONG, FENG XIULI, et al, 2016. Surface sediment characteristics and dynamics in Beibu gulf[J]. Periodical of Ocean University of China, 46(5): 83-89. (in Chinese with English abstract).

许慎栋, 张志楠, 余克服, 等, 2021. 南海造礁珊瑚 Favia palauensis 营养方式的空间差异及其对环境适应性的影响[J]. 中国科学：地球科学, 51(6): 927-940. XU SHENDONG, ZHANG ZHINAN, YU KEFU, et al, 2021. .Spatial variations in the trophic status of Favia palauensis corals in the South China Sea: Insights into their different adaptabilities under contrasting environmental conditions[J]. Science China Earth Sciences, 51(6): 927-940. (in Chinese with English abstract).

荀涛, 胡鹏, 梅弢, 等, 2009. 西沙群岛珊瑚砂运动特性试验研究[J]. 水道港口, 30(4): 277-281. XUN TAO, HU PENG, MEI TAO, et al, 2009. Study on movement characteristics of coral sands in Xisha Islands[J]. Journal of Waterway and Harbor, 30(4): 277-281. (in Chinese with English abstract).

晏宏, 孙立广, 刘晓东, 等, 2010. 近 50 年来南海西沙群岛海域气候异常的 ENSO 效应[J]. 热带海洋学报, 29(5): 29-35. YAN HONG, SUN LIGUANG, LIU XIAODONG, et al, 2010. Relationship between ENSO events and

regional climate anomalies around the Xisha Islands during the last 50 years[J]. Journal Of Tropical Oceanography, 29(5): 29-35. (in Chinese with English abstract).

杨熙, 余威, 何静, 等, 2022. 海南黎安港海草床碳储量评估[J]. 海洋科学, 46(11): 116-125. YANG XI, YU WEI, HE JING, et al, 2022. Carbon storage in the seagrass beds of Li'an Bay, Hainan[J]. Marine Sciences, 46(11): 116-125. (in Chinese with English abstract).

尹桂金, 严岩, 2012. 大亚湾冬季沉积物中叶绿素含量与分布[J]. 生态学杂志, 31(11): 2834-2840. YIN GUIJIN, YAN YAN, 2012. Chlorophyll content and its distribution in the sediments of Daya Bayy, South China in winter[J]. Chinese Journal of Ecology, 31(11): 2834-2840. (in Chinese with English abstract).

余克服, 2012. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应[J]. 中国科学:地球科学, 42(8): 1160-1172. YU KEFU, 2012. Coral reefs in the South China Sea: Their response to and records on past environmental changes[J]. Sci China Earth Sci, 42(8): 1160-1172. (in Chinese with English abstract).

余克服, 2018. 珊瑚礁科学概论[M]. 北京：科学出版社: 39-42. YU KEFU, 2018. Introduction to the science of coral reef[M]. Beijing: Science Press: 39-42. (in Chinese with English abstract).

余克服, 宋朝景, 赵焕庭, 1995. 西沙群岛永兴岛地貌与现代沉积特征[J]. 热带海洋学报, 14(2): 24-31. YU KEFU, SONG CHAOJING, ZHAO HUANTING, 1995. the characters of geomorphology and modern sediments of Yongxing Island, Xisha Islands[J]. Journal of Tropic Oceanology, 14(2): 24-31. (in Chinese with English abstract).

赵美霞, 余克服, 张乔民, 2006. 珊瑚礁区的生物多样性及其生态功能[J]. 生态学报, 26(1): 186-194. ZHAO MEIXIA, YU KEFU, ZHANG QIAOMIN, 2006. Review on coral reefs biodiversity and ecological function[J]. Acta Ecologica Sinica, 26(1): 186-194. (in Chinese with English abstract).

赵强, 2010. 西沙群岛海域生物礁碳酸盐岩沉积学研究[D]. 青岛：中国科学院研究生院（海洋研究所）: 37-44. ZHAO QIANG, 2010. The sedimentary research about reef carbonatite in Xisha Waters[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences: 37-44. (in Chinese with English abstract).

ALEMU I J B, YAAKUB S M, YANDO E S, et al, 2022. Geomorphic gradients in shallow seagrass carbon stocks[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 265: 107681.

ALONGI D M, PFITZNER J, TROTT L A, 2006. Deposition and cycling of carbon and nitrogen in carbonate mud of the lagoons of Arlington and Sudbury Reefs, Great Barrier Reef[J]. Coral Reefs, 25(1): 123-143.

ALONGI D M, TROTT L A, PFITZNER J, 2008. Biogeochemistry of inter-reef sediments on the northern and central Great Barrier Reef[J]. Coral Reefs, 27(2): 407-420.

ATWOOD T B, MADIN E M P, HARBORNE A R, et al, 2018. Predators Shape Sedimentary Organic Carbon Storage in a Coral Reef Ecosystem[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 6: 110.

QU BAOXIAO, SONG JINMING, YUAN HUAMAO, et al, 2018. Sediment records and responses for anthropogenic activities of organic matter in the Daya Bay during recent one hundred years[J]. Haiyang Xuebao, 40(10): 119-130.

BERGER W, SMETACEK V, WEFER G, 1989. Ocean productivity and paleoproductivity—an overview[J]. Productivity of the ocean: present and past, 44: 1-34.

BLANCKAERT A C A, REEF R, PANDOLFI J M, et al, 2020. Variation in the elemental stoichiometry of the coral–zooxanthellae symbiosis[J]. Coral Reefs, 39(4): 1071-1079.

BORDOVSKIY O K, 1965. Sources of organic matter in marine basins[J]. Marine Geology, 3(1): 5-31.

BOUTTON T W, 1991. Stable carbon isotopes ratios of natural materials. II. Atmospheric, terrestrial, marine and freswater environmental [J]. Carbon Isotopes Techniques, 155-171.

BRIAND M J, BONNET X, GOIRAN C, et al, 2015. Major sources of organic matter in a complex coral reef lagoon: identification from isotopic signatures ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$)[J]. PloS one, 10(7): e0131555.

BRUNSKILL G J, ZAGORSKIS I, PFITZNER J, 2002. Carbon Burial Rates in Sediments and a Carbon Mass Balance for the Herbert River Region of the Great Barrier Reef Continental Shelf, North Queensland, Australia[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 54(4): 677-700.

CARTAPANIS O, BIANCHI D, JACCARD S L, et al, 2016. Global pulses of organic carbon burial in deep-sea sediments during glacial maxima[J]. Nature Communications, 7(1): 10796.

CHEN LIANG, YIN ZHENXIN, TANG MENG, et al 2022. Distribution and Genesis of Organic Carbon Storage on the Northern Shelf of the South China Sea[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(18): 11367.

CHEN XIAOYAN, YU KEFU, HUANG XUEYONG, et al, 2019. Atmospheric Nitrogen Deposition Increases the Possibility of Macroalgal Dominance on Remote Coral Reefs[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 124(5): 1355-1369.

CLAUDE C R, SOURNIA A, 1990. The comparative estimation of phytoplanktonic, microphytobenthic and macrophytobenthic primary production in the oceans[J]. Marine Microbial Food Webs, 4(1): 31-57.

CROSSLAND C J, HATCHER B G, SMITH S V, 1991. Role of coral reefs in global ocean production[J]. Coral Reefs, 10(2): 55-64.

DAVIS K, COLEFAX A, TUCKER J, et al, 2021. Global coral reef ecosystems exhibit declining calcification and increasing primary productivity[J]. Communications Earth & Environment, 2(1): 105.

DUARTE C M, MIDDELBURG J J, CARACO N, 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle[J]. BIOGEOSCIENCES, 2(1): 1-8.

ESTES E R, POCKALNY R, D'HONDT S, et al, 2019. Persistent organic matter in oxic subseafloor sediment[J]. Nature Geoscience, 12(2): 126-131.

FALKOWSKI P, SCHOLES R J, BOYLE E, et al, 2000. The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System[J]. Science, 290(5490): 291-296.

FEY P, PARRAVICINI V, LEBRETON B, et al, 2020. Sources of organic matter in an atypical phytoplankton rich coral ecosystem, Marquesas Islands: composition and properties[J]. Marine Biology, 167(7): 92.

GAO YU, ZHOU JIAN, WANG LIMING, et al, 2019. Distribution patterns and controlling factors for the soil organic carbon in four mangrove forests of China[J]. Global Ecology and Conservation, 17: e00575.

GE CHENDONG, WANG YAN, PEDERSEN T, et al, 2007. Variablity of organic carbon isotope, nitrogen isotope, and C/N in the Wanquan River Estuary, eastern Hainan Island[J]. Quaternary Sciences, 27(5): 845-852.

GIRI C, OCHIENG E, TIESZEN L L, et al, 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data[J]. Global Ecology and Biogeography, 20(1): 154-159.

GOVE J M, MCMANUS M A, NEUHEIMER A B, et al, 2016. Near-island biological hotspots in barren ocean basins[J]. Nature Communications, 7(1): 10581.

HATCHER B G, 1988. Coral reef primary productivity: A beggar's banquet[J]. Trends in Ecology & Evolution, 3(5): 106-111.

HEIL C, CHASTON K, JONES A, et al, 2004. Benthic microalgae in coral reef sediments of the southern Great Barrier Reef, Australia[J]. Coral Reefs, 23: 336-343.

HUNG C-C, GUO L, SCHULTZ JR G E, et al, 2003. Production and flux of carbohydrate species in the Gulf of Mexico[J]. Global biogeochemical cycles, 17(2): 1055.

JAIKUMAR M, 2010. Macro benthic community structure on Tuticorin coastal waters, Gulf of Mannar, south east coast of India[J]. World Journal of fish and marine science, 2(1): 70-77.

JANKOWSKA E, MICHEL L N, ZABORSKA A, et al, 2016. Sediment carbon sink in low-density temperate eelgrass meadows (Baltic Sea)[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 121(12): 2918-2934.

KACZMARSKY L, RICHARDSON L L, 2011. Do elevated nutrients and organic carbon on Philippine reefs increase the prevalence of coral disease?[J]. Coral Reefs, 30(1): 253-257.

KE ZHIXIN, TAN YEHUI, HUANG LIANGMIN, et al, 2018. Spatial distribution patterns of phytoplankton biomass and primary productivity in six coral atolls in the central South China Sea[J]. Coral Reefs, 37(3): 919-927.

KEIL R, 2017. Anthropogenic Forcing of Carbonate and Organic Carbon Preservation in Marine Sediments[J]. Annual Review of Marine Science, 9(1): 151-172.

KIENAST M, HIGGINSON M J, MOLLENHAUER G, et al, 2005. On the sedimentological origin of down-core variations of bulk sedimentary nitrogen isotope ratios[J]. Paleoceanography, 20(2).

KöSTER M, MEYER-REIL L A, 2001. Characterization of carbon and microbial biomass pools in shallow water coastal sediments of the Southern Baltic Sea (Nordrügensche Bodden)[J]. Marine Ecology Progress Series, 214: 25-41.

KU HUIWEI, CHEN YUEGAU, CHAN POSHUN, et al, 2007. Paleo-environmental evolution as revealed by analysis of organic carbon and nitrogen: A case of coastal Taipei Basin in Northern Taiwan[J]. Geochemical Journal, 41(2): 111-120.

LAMB A L, WILSON G P, LENG M J, 2006. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using δ13C and C/N ratios in organic material[J]. Earth-Science Reviews, 75(1): 29-57.

LI YAN, ZHOU QIANZHI, XU XIANGPO, et al 2021. Source Indication and Geochemical Significance of Sedimentary Organic Matters from the Xisha Area, the South China Sea [J]. Molecules, 26(22): 6808.

LORENZEN C J, 1967. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations[J]. Limnology and oceanography, 12(2): 343-346.

MACREADIE P I, SERRANO O, MAHER D T, et al, 2017. Addressing calcium carbonate cycling in blue carbon accounting[J]. Limnology and Oceanography Letters, 2(6): 195-201.

MARQUES J A, COSTA P G, MARANGONI L F B, et al, 2019. Environmental health in southwestern Atlantic coral reefs: Geochemical, water quality and ecological indicators[J]. Science of The Total Environment, 651: 261-270.

MCLAREN P, BOWLES D, 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions[J]. Journal of Sedimentary Research, 55(4): 457-470.

MMCLEOD E, CHMURA G L, BOUILLON S, et al, 2011. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 9(10): 552-560.

MEYERS P A, 1994. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J].

Chemical Geology, 114(3): 289-302.

MEYERS P A, 1997. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. Organic Geochemistry, 27(5): 213-250.

MIYAJIMA T, KOIKE I, YAMANO H, et al, 1998. Accumulation and transport of seagrass-derived organic matter in reef flat sediment of Green Island, Great Barrier Reef[J]. Marine Ecology Progress Series, 175: 251-259.

MIYAJIMA T, TANAKA Y, KOIKE I, et al, 2007. Evaluation of spatial correlation between nutrient exchange rates and benthic biota in a reef-flat ecosystem by GIS-assisted flow-tracking[J]. Journal of Oceanography, 63(4): 643-659.

NICOLAS M, PERGENT G, 2006. The outstanding traits of the functioning of the Posidonia oceanica seagrass ecosystem[J]. Biol Mar Medit, 13(4): 109-113.

O'LEARY M H, 1988. Carbon Isotopes in Photosynthesis: Fractionation techniques may reveal new aspects of carbon dynamics in plants[J]. BioScience, 38(5): 328-336.

PAGE C, LEGGAT W, EGAN S, et al, 2023. A coral disease outbreak highlights vulnerability of remote high-latitude lagoons to global and local stressors[J]. iScience, 26(3): 106205.

PAGE H, ANDERSSON A, JOKIEL P, et al, 2016. Differential modification of seawater carbonate chemistry by major coral reef benthic communities[J]. Coral Reefs, 35: 1311-1325.

POST W M, PENG T-H, EMANUEL W R, et al, 1990. The global carbon cycle[J]. American scientist, 78(4): 310-326.

PRAHL F G, BENNETT J T, CARPENTER R, 1980. The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 44(12): 1967-1976.

RASHEED M, AL-NAJJAR T, DAMHOUREYEH S, 2011. Distributions of pigments in reef sediments, contribution of phytoplankton to organic matter budget in coral reef[J]. Natural Science, 3(5): 344-350.

RAVEN J A, JOHNSTON A M, KüBLER J E, et al, 2002. Mechanistic interpretation of carbon isotope discrimination by marine macroalgae and seagrasses[J]. Funct Plant Biol, 29(3): 355-378.

REMEIKAITĖ-NIKIENĖ N, LUJANIENĖ G, MALEJEVAS V, et al, 2016. Distribution and sources of organic matter in sediments of the south-eastern Baltic Sea[J]. Journal of Marine Systems, 157: 75-81.

RIEGL B, GLYNN P W, WIETERS E, et al, 2015. Water column productivity and temperature predict coral reef regeneration across the Indo-Pacific[J]. Sci Rep, 5(1): 8273.

ROZAIMI M, LAVERY P S, SERRANO O, et al, 2016. Long-term carbon storage and its recent loss in an estuarine Posidonia australis meadow (Albany, Western Australia)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 171:58-65.

SAMPER-VILLARREAL J, LOVELOCK C E, SAUNDERS M I, et al, 2016. Organic carbon in seagrass sediments is influenced by seagrass canopy complexity, turbidity, wave height, and water depth[J]. Limnology and Oceanography, 61(3): 938-952.

SANDERS C J, SMOAK J M, WATERS M N, et al, 2012. Organic matter content and particle size modifications in mangrove sediments as responses to sea level rise[J]. Marine Environmental Research, 77: 150-155.

SCHRIMM M, BUSCAIL R, ADJEROUD M, 2004. Spatial variability of the biogeochemical composition of surface sediments in an insular coral reef ecosystem: Moorea, French Polynesia[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 60(3): 515-528.

SEITER K, HENSEN C, SCHRöTER J, et al, 2004. Organic carbon content in surface sediments—defining regional

provinces[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 51(12): 2001-2026.

SERRANO O, LAVERY P S, ROZAIMI M, et al, 2014. Influence of water depth on the carbon sequestration capacity of seagrasses[J]. Global biogeochemical cycles, 28(9): 950-961.

SHEKHAR S, KUMARESAN S, CHAKRABORTY S, et al, 2019. Total organic carbon profile in water and sediment in coral reef ecosystem of Agatti Island, Lakshadweep Sea[J]. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 48(936-942.

SMITH S V, 1978. Coral-reef area and the contributions of reefs to processes and resources of the world's oceans[J]. Nature, 273(5659): 225-226.

SOROKIN Y I, 1995a. Benthic Microflora, Periphyton and Plant Associations[M]//YURI I. SOROKIN. Coral Reef Ecology. Berlin, Heidelberg:Springer Berlin Heidelberg: 127-160.

SOROKIN Y I, 1995b. Reef Lime Constructions[M]//YURI I. SOROKIN. Coral Reef Ecology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 4-33.

STORLAZZI C D, BROWN E K, FIELD M E, et al, 2005. A model for wave control on coral breakage and species distribution in the Hawaiian Islands[J]. Coral Reefs, 24(1): 43-55.

SUZUKI A, KAWAHATA H, 2003. Carbon budget of coral reef systems: an overview of observations in fringing reefs, barrier reefs and atolls in the Indo-Pacific regions[J]. Tellus B, 55(2): 428-444.

SUZUKI A, KAWAHATA H, 2004. Reef water CO_2 system and carbon production of coral reefs: Topographic control of system-level performance[J]. Global Environmental Change in the Ocean and on Land.

TANAKA Y, MIYAJIMA T, WATANABE A, et al, 2011. Distribution of dissolved organic carbon and nitrogen in a coral reef[J]. Coral Reefs, 30(2): 533-541.

THOMASSIN B A, CAUWET G, 1985. Organic matter distribution in sediments of the Tulear coral reef complexes[C]. Proc. 5th Int. Coral Reef Symp., 3: 377–382.

UMEZAWA Y, MIYAJIMA T, KOIKE I, 2008. Stable nitrogen isotope composition in sedimentary organic matter as a potential proxy of nitrogen sources for primary producers at a fringing coral reef[J]. Journal of Oceanography, 64(6): 899-909.

VAUGHAN E J, WYNN P M, WILSON S K, et al, 2021. Precision and cost-effectiveness of bioindicators to estimate nutrient regimes on coral reefs[J]. Marine pollution bulletin, 170: 112606.

WATANABE A, NAKAMURA T, 2019. Carbon Dynamics in Coral Reefs[M]// WATANABE A, NAKAMURA T. Blue Carbon in Shallow Coastal Ecosystems: Carbon Dynamics, Policy, and Implementation. Singapore: Springer Singapore: 273-293.

WERNER U, BIRD P, WILD C, et al, 2006. Spatial patterns of aerobic and anaerobic mineralization rates and oxygen penetration dynamics in coral reef sediments[J]. Marine Ecology Progress Series, 309: 93-105.

WILD C, HUETTEL M, KLUETER A, et al, 2004. Coral mucus functions as an energy carrier and particle trap in the reef ecosystem[J]. Nature, 428(6978): 66-70.

WILD C, RASHEED M, JANTZEN C, et al, 2005. Benthic metabolism and degradation of natural particulate organic matter in carbonate and silicate reef sands of the Northern Red Sea[J]. Marine Ecology-Progress Series, 298(69-78.

WYATT A, LOWE R, HUMPHRIES S, et al, 2013. Particulate nutrient fluxes over a fringing coral reef: Source-sink dynamics inferred from carbon to nitrogen ratios and stable isotopes[J]. Limnology and Oceanography,

58(409-427.

XIA JIA, HAN YONGQIANG, TAN JINGQIAN, et al, 2022. The Characteristics of Organic Carbon in the Offshore Sediments Surrounding the Leizhou Peninsula, China[J]. Frontiers in Earth Science, 10:648337.

YAMAMURO M, KAYANNE H, MINAGAWAO M, 1995. Carbon and nitrogen stable isotopes of primary producers in coral reef ecosystems[J]. Limnology and Oceanography, 40(3): 617-621.

YAN HONGQIANG, YU KEFU, SHI QI, et al, 2018. Air-sea CO_2 fluxes and spatial distribution of seawater pCO_2 in Yongle Atoll, northern-central South China Sea[J]. Continental Shelf Research, 165: 71-77.

YANG HONGQIANG, YU KEFU, ZHAO MEIXIA, et al, 2015. Impact on the coral reefs at Yongle Atoll, Xisha Islands, South China Sea from a strong typhoon direct sweep: Wutip, September 2013[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 457-466.

YANG W F, HUANG Y P, CHEN M, et al, 2011. Carbon and nitrogen cycling in the Zhubi coral reef lagoon of the South China Sea as revealed by ^{210}Po and ^{210}Pb[J]. Marine pollution bulletin, 62(5): 905-911.

YOGESH KUMAR J S, GEETHA S, SORNARAJ R, 2014. Seasonal Changes of Sedimentation Rates and Sediment Characteristics Status in the Gulf of Mannar Coral Island, India[J]. International Letters of Natural Sciences, 1: 8-24.

YU FENGLING, ZONG YONGQIANG, LLOYD J, et al, 2010. Bulk organic $\delta^{13}C$ and C/N as indicators for sediment sources in the Pearl River delta and estuary, southern China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 87: 618-630.

YU JING, ZHANG HUA, 2017. Source apportionment of sediment organic material in a semi-enclosed sea using Bayesian isotopic mixing model[J]. Marine pollution bulletin, 119(1): 365-371.

YUE YUANFU, YU KEFU, TAO SHICHEN, et al, 2019. 3500-year western Pacific storm record warns of additional storm activity in a warming warm pool[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 521: 57-71.

ZHAO MEIXIA, YU KEFU, SHI QI, et al, 2017. Comparison of coral diversity between big and small atolls: a case study of Yongle atoll and Lingyang reef, Xisha Islands, central of South China Sea[J]. Biodiversity and Conservation, 26(5): 1143-1159.

ZHAO MEIXIA, YU KEFU, SHI QI, et al, 2016. The coral communities of Yongle atoll: status, threats and conservation significance for coral reefs in South China Sea[J]. Marine and Freshwater Research, 67(12): 1888-1896.